

冻融作用与含水量对黑土中活性有机碳的影响

王楠^{1,2}, 王洋¹, 崔政武^{1*}, 袁玉玉^{1,2}, 徐林浩³, 张珂瑜¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 延边大学, 吉林 延吉 133002)

摘要: 【目的】明确冻融条件对土壤活性有机碳影响程度, 为黑土区有机碳保持和碳平衡的研究提供基础数据和理论依据。【方法】以德惠地区典型中层黑土为研究对象, 通过冻融控制试验, 研究不同冻融频次、冻结时间、冻融温度及土壤含水量对土壤活性有机碳的影响。【结果】土壤活性有机碳组分对冻融条件的响应差异显著。土壤可溶性有机碳、轻组有机碳、颗粒有机碳含量随着冻融频次的增加逐渐增加, 当冻融 20 次后, 含量变化幅度较小, 逐渐趋于稳定; 土壤微生物量碳含量在冻融 12 次后处于 0.160~0.164 g kg⁻¹ 之间波动。冻结温度降低、融化温度升高均可促进土壤可溶性有机碳、轻组有机碳和颗粒有机碳含量增加, 而土壤微生物量碳含量则随冻结温度的降低而降低, 随融化温度的升高而增加, 但含量仍比对照处理低 10.42%~24.48%。土壤可溶性有机碳、轻组有机碳和颗粒有机碳含量随着冻结时间的增加差异显著, 冻结时间为 12~48 h 时, 增幅较大; 冻结时间增加使得土壤微生物量碳含量显著降低, 冻结时间为 96 h 时, 降幅可达 52.60%。随着土壤含水量增加可溶性有机碳、轻组有机碳和颗粒有机碳含量逐渐增加, 当含水量为田间持水量的 80%~100% 时, 轻组有机碳含量增加最显著, 增幅达到 9.69%~38.48%; 而土壤微生物量碳含量则逐渐降低, 当含水量为田间持水量的 80%~100% 时, 含量降低不显著。【结论】冻融循环有利于增强或维持土壤有机碳含量, 频繁的冻融作用能够提高部分活性有机碳组分含量, 促进土壤养分循环。

关键词: 冻融循环; 含水量; 黑土; 活性有机碳

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)04-0953-07

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2023083101

王楠, 王洋, 崔政武, 袁玉玉, 徐林浩, 张珂瑜. 冻融作用与含水量对黑土中活性有机碳的影响 [J]. 土壤通报, 2024, 55(4): 953-959

WANG Nan, WANG Yang, CUI Zheng-wu, YUAN Yu-yu, XU Lin-hao, ZHANG Ke-yu. The Influence of Freeze-thaw Effect and Moisture Content on Active Organic Carbon in Black Soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(4): 953-959

【研究意义】冻融循环是由于土壤温度在 0℃ 附近上下波动而产生冻结和融化的物理现象, 普遍存在于中高纬度和高海拔地区。含水量是影响和调控土壤有机质矿化的重要因子, 不同土壤含水量会导致土壤理化性质发生改变, 冻融循环通过改变土壤团聚体、粒径组成和含水量分布等理化性质^[1], 进而影响土壤微生物活性、有机碳迁移转化和以微生物为媒介的有机质矿化作用^[2]。可溶性有机碳 (DOC)、轻组有机碳 (LFOC (包括游离轻组有机碳 (FLFOC) 和包裹态轻组有机碳 (ELFOC)))、微生物量碳 (MBC) 和颗粒有机碳 (POC) 等是土壤活性有机碳的主要表征指标, 具有高有效性、易被微生物分解矿化和直接对植物供给养分等特性, 能够快速反映土壤有机碳对环境变化的响应, 且受

到土壤水热变化及冻融过程的显著影响^[3]。【前人研究进展】DOC 来源于植物凋落物、土壤腐殖质、微生物和根系及其分泌物, 对土壤中养分元素的迁移转化以及微生物的碳源供应具有重要作用^[4]。LFOC 是土壤有机碳中易于分解的敏感部分, 其含量是土壤有机碳总量的 15%~32%, 比全土土壤有机碳周转速率快 3~11 倍, 可作为土壤碳变化的早期指标。MBC 是土壤微生物量的表征指标, 参与有机碳的矿化分解、腐殖质的形成、迁移转化等生化过程, 对土壤有机碳在不同碳库之间的转移起着直接作用。POC 是以较轻的自由态存在或被包裹在土壤颗粒中的较大的有机质颗粒 (0.25~2 mm)^[5], 是反映生态过程对土壤有机碳库影响的敏感指标。在田间或室内模拟实验条件下, Grogan 等^[6]研究发现, 冻结处

收稿日期: 2023-08-31; 修订日期: 2024-01-15

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20210203005SF)、国家基础资源调查专项 (2021FY100402) 和中国科学院战略性先导科技专项 (XDA28020102) 资助

作者简介: 王楠 (1998-), 女, 吉林省松原市人, 在读博士, 研究方向为环境生态与生物地球化学。E-mail: wangnan@iga.ac.cn

*通讯作者: E-mail: cuizhengwu@iga.ac.cn

理和少次冻融循环对土壤 MBC 没有显著影响。但 Schimel 和 Clein^[7] 及 Larsen 等^[8] 发现土壤 MBC 随冻融次数的增加呈现出先减少后增加的变化趋势, 且随着温度的降低, 其含量也逐渐降低。周旺明等^[9] 发现, 湿地土壤 DOC 随着冻融次数的增加表现出先升高后降低的规律; 而土壤 POC 含量随着冻融循环次数的增加逐渐减小^[10]。【本研究切入点】目前对黑土区土壤活性有机碳的报道多见于施肥或土地利用方式的影响, 关于冻融作用则过多注重湿地生态方面, 且大多数关注于冻融循环次数和冻结温度方面, 而含水量对活性有机碳影响需进一步研究。【拟解决的问题】以东北地区典型中层农田黑土为研究对象, 旨在全面了解冻融作用以及含水量对黑土中活性有机碳的影响, 揭示土壤活性有机碳的变化规律, 为更深入了解土壤生态系统的响应机制提供科学依据, 对进一步研究黑土碳库平衡和土壤肥力保持具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区与样品采集

德惠市 (44°12' N, 125°33' E) 位于吉林省长春市北部, 属寒温带大陆性季风气候, 年降雨量约 500~650 mm, 主要集中在 4~9 月。年平均气温 4.2℃, 每年 3 月中旬开始, 地表冻土层随气温升高而逐渐融化, 到 11 月初气温逐渐下降, 季节融化层回冻变薄, 冻结层加深, 在季节冻土层和融化层形成的过程中, 土壤经历着反复的冻融过程^[9]。土壤类型为典型黑土, 质地为壤质黏土, 土壤有机质含量较高。

2021 年 10 月初, 在中国科学院东北地理与农业生态研究所德惠试验站采集玉米农田 0~10 cm 表层土壤样品, 去除较大植物残体等杂质后过 2 mm 筛, 一部分风干后用于土壤理化性质分析, 另一部分用于冻融模拟试验。供试土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil tested

理化指标 Physicochemical index	pH 值 pH	容重 (g cm ⁻³) Soil bulk density	有机碳 (g kg ⁻¹) Organic carbon	田间持水量 (%) Field moisture capacity	粘粒含量 (%) Clay content
德惠黑土	6.14	1.12	24.8	43.5	33.57

1.2 试验设计

称取 500 g 供试土壤于 1L 烧杯中, 调整含水量为田间持水量的 80%, 在 10℃ 的恒温培养箱中恒温预培养 14 d。设置不同冻融频次、冻结时间、冻融温度和土壤含水量等条件进行冻融试验, 同时做未冻融处理作为对照试验, 保持对照试验培养温度为 10℃。每个处理 3 次重复。

(1) 冻融频次的影响

按照表 2 冻融交替控制的温度和时间, 利用 TRC-50 型高低温试验箱进行冻融模拟试验, 设置含水量为田间持水量的 80%, 冻结温度为 -10℃、融化

温度为 5℃, 以 24 h 为 1 个冻融交替周期, 采用程序控制梯度升温 and 降温的方式, 进行 0、2、4、8、12、20 和 32 次冻融交替次数试验。

(2) 冻融强度的影响

a. 冻结和融化温度的影响

按照表 2 中设置的冻融交替时间, 以 24 h 为一个冻融交替周期, 设置含水量为田间持水量的 80%, 控制冻结温度分别为 -5℃、-10℃ 和 -15℃, 融化温度为 5℃, 进行 12 次冻融循环试验。

b. 冻结和融化时间的影响

按照表 2 中设置的冻融循环温度, 设置含水量为田间持水量的 80%, 控制冻结时间分别为 12、24、48、72 和 96 h, 融化时间为 12 h, 进行 12 次冻融循环试验。

(3) 土壤水分含量的影响

调节土壤水分含量, 使得土壤含水量分别为田间持水量的 40%、80%、100% 和 120%, 进行 12 次冻融循环试验。同时保持对照土壤含水量为田间持水量的 80%。

1.3 实验方法

土壤田间持水量采用室内环刀法测定。土壤

表 2 冻融交替试验控制的温度和时间

Table 2 The temperature and time of freeze-thaw alternating test

段数 Section	时间 (h) Time	温度 (℃) Temperature
1 降温	1	5~0
2 降温	1	0~-10
3 冻结	10	-10
4 升温	1	-10~0
5 升温	1	0~5
6 融化	10	10

DOC 采用蒸馏水浸提法提取, 滤液用 TOC-VCPH 有机碳分析仪测定^[11]。土壤 LFOC 参照碘化钠分离方法, 分离出的轻组、重组有机碳, 研磨过 0.15 mm 筛后, 采用外加热—重铬酸钾氧化容量法测定。土壤 MBC 采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法提取, 通过熏蒸和未熏蒸样品的浸提液测定有机碳差值 (Ec), 利用公式 $MBC = Ec/0.38$ 计算获得。土壤 POC 参照庄海艳等^[9]的方法进行测定。

1.4 统计分析

采用 SPSS 27.0 软件对数据进行统计分析, 利用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 对不同冻融循环条件和土壤水分含量条件下的土壤活性碳组分含量进行差异显著分析, 采用 Duncan 法进行不同处理下不同指标之间的差异显著性检验, 当 $P < 0.05$ 时, 差异性在统计学上有意义。采用 Excel 2016 和 Origin 2021 软件进行绘图。

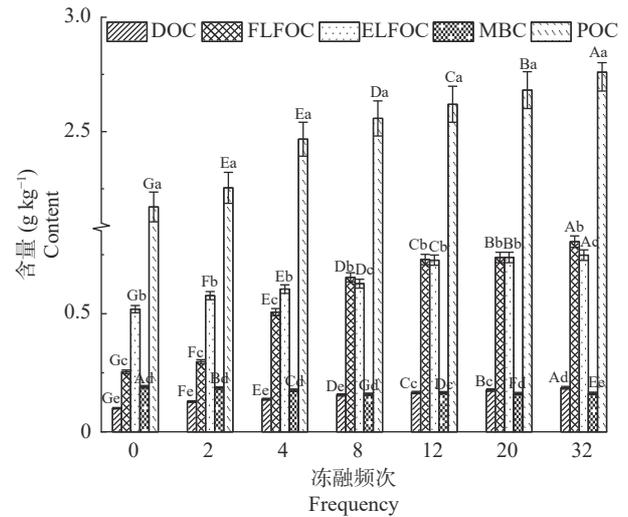
2 结果与分析

2.1 冻融频次对黑土活性有机碳组分的影响

如图 1 所示, 在土壤含水量为田间持水量的 80%, 冻结温度为 -10℃、融化温度为 5℃ 的冻融循环条件下, 不同冻融频次对土壤活性有机碳组分均有显著影响 ($P < 0.05$)。随着冻融频次的增加, 土壤 DOC、LFOC 均逐渐增加, 土壤 DOC 含量在冻融循环 4 次后增加趋势逐渐平缓, 在冻融循环 32 次后其含量增加了 93.31%; 冻融循环 8~32 次后, 土壤 FLFOC 含量增幅在 0.61%~3.59% 之间; 而土壤 ELFOC 含量在冻融 12 次时可增加 38.81%, 此后趋于平缓。土壤 MBC 随着冻融次数增加逐渐降低, 冻融循环 12~32 次时, MBC 含量在 0.160~0.164 g kg⁻¹ 之间; 土壤 POC 含量在冻融循环 8 次时, 比未冻融状态增加 18.06%, 此后随冻融交替次数的增加, 其含量增加平缓且有逐渐降低的趋势。

2.2 冻融强度对黑土活性有机碳组分的影响

2.2.1 冻融温度的影响 如图 2 所示, 在土壤含水量为田间持水量的 80% 条件下, 经过 12 次冻融循环后发现, 冻结温度的降低和融化温度的升高均可促进土壤 DOC、LFOC 含量的增加。当冻结温度为 -15℃、融化温度为 10℃ 时, 土壤 DOC 含量较对照分别增加了 95.42% 和 100.63%; 当冻结温度为 -15℃ 时, 与对照相比, 土壤 FLFOC 和 ELFOC 含量增幅分别为 18.67%~30.32% 和 16.83%~40.34%。当融化温度为 10℃ 时, 土壤 FLFOC 和 ELFOC 含量分

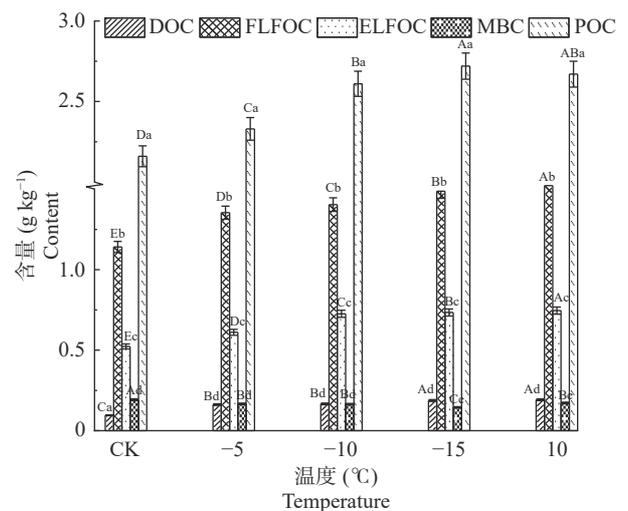


注:不同大写字母表示相同活性有机碳组分不同冻融循环次数时的差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同冻融循环次数时不同活性有机碳组分的差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 冻融频次对各活性有机碳组分的影响

Fig.1 Effects of freeze-thaw frequency on active organic carbon components

别比对照增加了 33.57% 和 42.64%。与此相反, 随着冻结温度的降低, 土壤 MBC 含量呈现降低的趋势, 而融化温度增高时土壤 MBC 含量略有增加。当冻结温度由 -5℃ 降至 -15℃ 时, 土壤 MBC 含量比对照状态降低了 13.54%~24.48%; 融化温度为 10℃ 时, 土壤 MBC 含量比对照状态降低了 10.42%, 但比融化温度为 5℃ 时增高了 4.16%。土壤 POC 含量变化



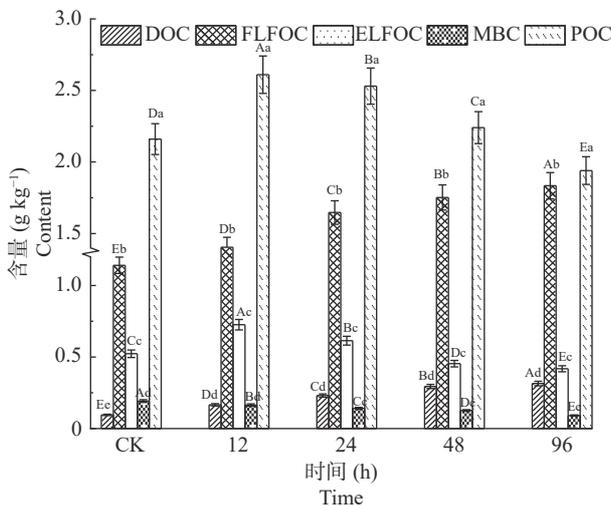
注:不同大写字母表示相同活性有机碳组分不同冻结温度时的差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同冻结温度时不同活性有机碳组分的差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 冻融温度对各活性有机碳组分的影响

Fig.2 Effect of freeze-thaw temperature on active organic carbon components

与土壤 MBC 相反，随着冻结温度的降低，土壤 POC 含量逐渐增加，当冻结温度为 -15°C 时，土壤 POC 的含量增加了 5.10%，而冻结温度从 -5°C 降低到 -10°C 时，土壤 POC 含量增加了 12.96%。

2.2.2 冻融时间的影响 在土壤含水量为田间持水量的 80%，冻结温度为 -10°C 、融化温度为 5°C 的冻融循环条件下，随着冻结时间的增加，土壤 DOC 含量逐渐增加，当冻结时间为 48 h 时，可增加 207.21%，但冻结时间越长 DOC 含量提高不显著（图 3）。随着冻结时间的增加，土壤 FLFOC 含量逐渐增加，但冻结时间越长增加幅度却逐渐减小，当冻结时间为 96 h 时，其含量增加了 60.74%；土壤 ELFOC 含量呈先增加后逐渐降低的趋势，当冻结时间为 48~96 h 时，土壤 ELFOC 含量降低了 13.19%~17.40%。土壤 MBC 含量随着时间增加则呈逐渐降低的趋势，当冻结时间为 12~96 h 时，土壤 MBC 含量比对照降低了 14.58%~52.60%。随着冻结时间增加，土壤 POC 含量呈先增加后逐渐降低的趋势，当冻结时间为 12 h 时，土壤 POC 的增加幅度最大，相比于对照增加了 20.83%，而随着冻结时间的增加，POC 含量逐渐降低。



注:不同大写字母表示相同活性有机碳组分不同冻结时间时的差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示相同冻结时间时不同活性有机碳组分的差异显著 ($P < 0.05$)。

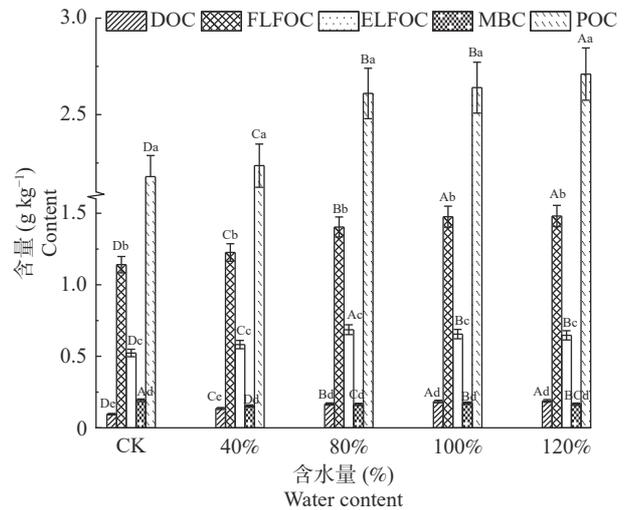
图 3 冻融时间对各活性有机碳组分的影响

Fig.3 Effect of freeze-thaw time on active organic carbon components

2.3 含水量对黑土活性有机碳组分的影响

如图 4 所示，在冻结温度为 -10°C 、融化温度为 5°C 的冻融温度条件下，经过 12 次冻融循环后发现，当含水量为田间持水量的 40%~100% 时，土

壤 DOC 含量在 $0.135 \sim 0.184 \text{ g kg}^{-1}$ 之间，比未冻融对照处理增加了 18.42%~21.85%，但当含水量为田间持水量的 120% 时，土壤 DOC 增加量显著降低，相比于未冻融对照处理仅增加 20.51%。当含水量为田间持水量的 100% 时，与未冻融对照相比，土壤 FLFOC 与 ELFOC 含量分别增加了 11.82%、38.48%。冻融使得土壤 MBC 含量逐渐降低，降低幅度在 22.73%~31.54% 之间。当含水量为田间持水量的 80%~100% 时，MBC 含量逐渐趋于稳定。冻融作用促进不同含水量土壤 POC 含量的增加，当含水量为田间持水量的 40% 时，土壤的 POC 含量与未冻融对照相比变化不明显，当含水量分别为田间持水量的 80%、100% 和 120% 时，土壤 POC 增加量分别为 10.59%、6.88% 和 15.81%。



注:不同大写字母表示相同活性有机碳组分不同含水量时的差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示相同含水量时不同活性有机碳组分的差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 含水量对各活性有机碳组分的影响

Fig.4 Effect of water content on active organic carbon components

3 讨论

3.1 冻融作用对土壤可溶性有机碳的影响

土壤 DOC 作为活性有机碳的重要组成部分，其含量高低是土壤微生物对有机质分解与利用的综合反映，受土壤水热状况的显著影响，而土壤冻融循环必然会伴随着土壤的水热传递过程，直接影响土壤中的微生物活动和有机质的分解速率^[1]，进而影响 DOC 含量的动态变化。冻结前期，冻融循环使土壤中的不耐寒微生物死亡并分解，当土壤融化时，死亡微生物细胞内所含的有机碳溶解释放进入土壤，

从而增加 DOC 含量; 经多次冻融后, 微生物逐渐适应该环境, 耐低温微生物将死亡微生物细胞作为基质而使自身活性增强, 且土壤中原有的 DOC 不断地被活的微生物利用分解, 故土壤 DOC 含量有逐渐降低的趋势, 与土壤 MBC 含量先减少再增加的趋势一致, 而土壤 MBC 含量显著降低可能导致生物地球化学循环过程受限, 影响植物的生长和发育, 这一结论在刘淑霞等^[12]的研究中得到验证。冻融强度的巨大变化影响土壤的伸缩与膨胀, 导致土壤团聚体破碎, 释放出具有小分子量的有机质; 冻融也会造成不同粒径团聚体间的相互转化, 促进有机质与微生物之间的接触, 加速微生物降解能力和有机质周转能力, 进而增加 DOC 含量, 此变化趋势与赵光影等^[11]的研究结果相符。水分状况会引起土壤微生物数量、活性和种类的改变, 进而影响土壤 DOC 含量。庄海艳等^[9]研究发现含水量较低不利于土壤 DOC 溶出, 不能为驱动有机碳矿化过程的微生物提供足够的能源; 而较高水分的条件则有利于 DOC 的溶出。土壤 DOC 增加量在相对含水量超过 100% 时显著减小, 但其含量仍高于未冻融状态, 这种现象可能与有机质降解速率受土壤含水量影响而引起的。含水量过度饱和可能为微生物营造厌氧环境阻碍其生长, 使微生物活性变弱, 土壤呼吸强度也较低, 从而减缓有机质的分解。

3.2 冻融作用对土壤轻组有机碳的影响

土壤 LFOC 是指土壤中相对较易被微生物降解的有机碳, 这部分有机碳相可在短时间内发生代谢和分解, 主要受微生物活性、有机质稳定性和水分等因素的影响。土壤 LFOC 可为微生物提供碳源与能量, 对土壤生态系统中的碳循环和养分循环起关键作用。土壤中 LFOC 的高活性使其极易受到环境条件变化的影响, 而土壤冻融循环作用对土壤 LFOC 的影响是一个复杂的过程^[13]。LFOC 含量受冻融作用的影响显著, 在不同冻融循环频次、强度和水分等因素条件下, 土壤 LFOC 的含量整体上均呈增加的趋势, 这主要是由于冻融循环作用破坏土壤结构, 增加有机质的暴露, 而高冻融频次会加快土壤中有机物质的分解速率, 使其更容易受到微生物降解。马延虎等^[14]研究了冻融循环次数对不同退化草甸土壤中有机碳及组分含量的影响, 发现随着冻融循环次数的增加, 土壤 LFOC 含量增加了 33.24%~70.58%, 并认为频繁的冻融导致土壤不断膨胀和收缩, 使得与土壤结合的大分子量有机质的氢键断裂,

释放出小分子量有机质, 同时由于冻融循环破坏土壤团聚体, 使有机碳库中不同形态的碳不同程度地暴露出来, 进一步使小分子量有机质释放, 增加土壤中 LFOC 的含量, 这与本研究的结果一致。不同冻结温度和冻结时间条件下, 土壤 LFOC 的含量之间具有显著的差异性, 低温和长时间冻结条件下, 土壤 LFOC 含量较高。一方面是由于低温和长时间冻结使土壤水分形成更为稳定的冰层, 进而影响其可利用性, 降低微生物的活性、减缓有机物质分解速率, 使有机碳在土壤中相对稳定, 不易被微生物降解, 从而增加土壤 LFOC 含量。同时, 长时间的低温可改变土壤微观结构(如颗粒破碎和孔隙度的变化), 增加有机物质在土壤中的稳定性, 减缓其分解速率^[15]。土壤 LFOC 含量与前期含水量正相关, 在饱和相对含水量(100%)和过饱和相对含水量(120%)时, LFOC 含量显著高于相对含水量为 40% 和 CK 处理。高含水量可能影响土壤通透性, 限制气体交换, 对土壤中微生物呼吸和有机碳分解产生影响^[9]。而高初始含水量可能导致更多的水分参与冻融过程, 而冻结过程中的水分排斥作用和晶格结构的形成可能对土壤 LFOC 的分布和迁移产生影响^[16]。

3.3 冻融作用对颗粒有机碳的影响

土壤 POC 是指粒径在 53~2000 μm 间的土壤颗粒所含的有机碳, 主要来源于分解速度中等的植物残体分解, 通常被团聚体包裹后以颗粒形式(如颗粒有机物)存在于孔隙中或与微团聚体结合, 受土壤团聚体的稳定性及其形成过程的显著影响^[17]。冻融过程是影响土壤团聚体稳定性的重要自然因素, 决定土壤团聚体有机碳及各组分迁移转化的过程与强度, 对土壤碳库的稳定有重大影响。Ludwig 等^[10]研究发现, 土壤 POC 含量随着冻融循环次数的增加显著减小。但本研究却发现土壤 POC 含量随冻融频次增加呈先增加后增加缓慢或逐渐减小的趋势, 一方面可能是由于频繁的冻融循环能够提高土壤中微生物的活性, 尤其是在解冻阶段, 微生物活性的增加导致更多的颗粒态有机碳被分解和释放到土壤中; 另一方面, POC 可能与土壤矿物颗粒结合形成复合物, 具有一定的保护效应, 但多次冻融循环破坏了土壤 POC 与矿物颗粒之间的相互作用, 使 POC 被释放到土壤中。土壤 POC 含量随着冻结温度的降低而逐渐增加, 当冻结温度为 -15°C 时, 土壤 POC 含量最高。较低的冻结温度能够减缓土壤中微生物的

活动, 有机碳有更多的机会与水分结合, 从而更容易保持在颗粒态, 而不容易分解为更小的、水溶性的分子。低温冻结也可能使土壤团聚体破碎释放有机碳, 团聚体是土壤有机碳储存的场所, 团聚体的粒径不同, 储存的有机碳组分和能力也不同。土壤有机碳的稳定是通过不同团聚体形成过程来实现的, 团聚体粒径越小稳定性越强, 所固持的有机碳周转时间越长^[18]。由于受到有机碳的保护效应和微生物活性的影响, 短时间的冻结能够使土壤中的有机物质相对稳定地保持在颗粒态中而不易分解, 故当冻结时间增加, 土壤 POC 含量先增加后逐渐减小。但随着冻结时间的延长, 土壤团聚体不断地形成和破坏, 使颗粒之间的相互作用发生变化, 影响有机碳与土壤颗粒的结合方式和稳定性, 使有机物质从颗粒中释放或迁移出去, 从而降低 POC 含量。冻融的膨胀作用随土壤含水量的增加而增强。相对含水量为 120% 时, POC 含量最高, 此时水分可能与有机碳结合形成冰晶或液态水, 有助于保护 POC 免受微生物的分解; 且高含水量条件下, 土壤结构更加稳定, 颗粒之间的接触可能相对较少, 有机碳更容易被包裹在土壤颗粒中, 从而提高了 POC 含量。超过饱和相对含水量后膨胀作用开始下降, 冻融作用对团聚体稳定性的影响减弱, 冻结时土壤孔隙中冰晶的膨胀可将大团聚体破碎成小团聚体, 而细颗粒有向中等大小颗粒聚集的倾向, 使有机碳释放, 从而降低 POC 含量^[15]。

4 结论

冻融频次、冻融强度和含水量均可显著影响黑土中活性有机碳含量。随着冻融频次的增加, 土壤 DOC 含量增加显著, 增幅最高可达 93.31%。较低的冻结温度 (-15°C) 和较长的冻结时间 (48 ~ 96 h) 使土壤微生物活性及土壤 MBC 含量降低, 大部分微生物对于短时间条件下的冻融循环具有一定的抗性功能, 因此, 冻结时间越长对微生物的存活越不利。在冻融循环过程中较高的水分条件更有利于活性有机碳的积累, 当含水量为田间持水量的 80% ~ 100% 时, 冻融对土壤 DOC、LFOC、POC 促进作用最显著, 对保持土壤结构、维持水分有着重要作用。

冻融循环和含水量是土壤有机碳动态变化的重要驱动因素, 冻融作用能显著提高部分活性有机碳 (DOC、LFOC、POC) 的含量, 且冻融循环次数越多越不利于活性有机碳的积累。这些研究结果不仅有助于我们更深入地理解土壤生态系统中有有机碳的

动态变化, 也为未来的土壤管理和生态系统保护提供了科学依据。在考虑气候变化和土壤健康的背景下, 对预测土壤碳库的变化及其对全球碳循环的潜在影响具有重要的启示作用。

参考文献:

- [1] 王娇月, 宋长春, 王宪伟, 等. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 442 - 452.
- [2] 王洋, 刘景双, 王国平, 等. 冻融作用与土壤理化效应的关系研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 91 - 96.
- [3] 刘育红. 退化高寒草地土壤活性有机碳组分分布 [J]. 湖北农业科学, 2016, 55(17): 4375 - 4380 + 4384.
- [4] 肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异 [J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7625 - 7633.
- [5] 周旺明, 王金达, 刘景双, 等. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 1 - 6.
- [6] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 36(4): 641 - 654.
- [7] Schimel, Joshua P, and Joy S. Clein. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(8): 1061 - 1066.
- [8] Larsen S K, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types [J]. Applied Soil Ecology, 2002, 21(3): 187 - 195.
- [9] 庄海艳, 单博, 陈祥伟. 冻融时黑土耕层土壤活性有机碳响应特征 [J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(6): 77 - 80.
- [10] 刘淑霞, 王宇, 赵兰坡, 等. 冻融作用下黑土有机碳数量变化的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 984 - 990.
- [11] 赵光影, 郭冬楠, 江珊, 等. 冻融作用对小兴安岭典型湿地土壤活性有机碳的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5411 - 5417.
- [12] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态 [J]. 环境科学, 2011, 32(1): 290 - 297.
- [13] 马廷虎, 刘育红, 魏卫东. 冻融作用对退化高寒草甸土壤有机碳及组分的影响 [J]. 现代农业科技, 2018(20): 175 - 176.
- [14] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability [J]. Catena, 2003, 52(1): 1 - 8.
- [15] 王风, 韩晓增, 李良皓, 等. 冻融过程对黑土水稳性团聚体含量影响 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 915 - 919.
- [16] 余健, 房莉, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展 [J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4829 - 4838.
- [17] Ludwig B, Teepe R, Lopes V, et al. CO₂ and N₂O emissions from gleyic soils in the Russian tundra and a German forest during freeze-thaw periods—a microcosm study [J]. Soil Biology and Biochemistry 2006, 38(12): 3516-3519.
- [18] Chenu C., Plante A F. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the 'primary organo-mineral complex' [J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 596 - 607.

The Influence of Freeze-thaw Effect and Moisture Content on Active Organic Carbon in Black Soil

WANG Nan^{1,2}, WANG Yang¹, CUI Zheng-wu^{1*}, YUAN Yu-yu^{1,2}, XU Lin-hao³, ZHANG Ke-yu¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: **[Objective]** Conducting research on the impact of freeze-thaw conditions on soil active organic carbon can provide basic data and theoretical basis for the study of organic carbon conservation and carbon balance in black soil areas. **[Method]** Taking typical middle layer black soil in Dehui area as the research object, the effects of different freeze-thaw cycles, freezing time, freeze-thaw temperature, and moisture content on soil active organic carbon were investigated through freeze-thaw control experiments. **[Result]** There were significant differences in the response of soil active organic carbon components to freeze-thaw conditions. The content of Dissolved Organic Carbon (DOC), Light Organic Carbon (LFOC), and Particulate Organic Carbon (POC) in soil gradually increases with the increase of freeze-thaw cycles, and the growth rate slows down after 20 freeze-thaw cycles; Soil Microbial Biomass Carbon (MBC) fluctuates between 0.160 g kg⁻¹ and 0.164 g kg⁻¹ after 12 freeze-thaw cycles. Both a decrease in freezing temperature and an increase in melting temperature can promote an increase in soil DOC, LFOC, and POC content, while the soil MBC content decreases with a decrease in freezing temperature and increases with an increase in melting temperature. However, the content still decreases by 10.42% to 24.48% compared to the control state. The content of soil DOC, LFOC, and POC showed significant differences with the increase of freezing time, with a significant increase from 12 to 48 hours; The increase in freezing time resulted in a significant decrease in soil MBC content, with a decrease of 52.60% at 96 hours of freezing time. As the moisture content increases, the content of soil DOC, LFOC, and POC gradually increases. When the relative moisture content is between 80% and 100%, the increase in LFOC content is most significant, ranging from 9.69% to 38.48%; The soil MBC content gradually decreases, and the decrease tends to be gradual when the relative water content is between 80% and 100%. **[Conclusion]** The freeze-thaw cycle is beneficial for enhancing or maintaining soil organic carbon, and frequent freeze-thaw cycles can increase the content of some active organic carbon components and promote soil nutrient cycling.

Key words: Freeze-thaw cycle; Moisture content; Black soil; Active Organic Carbon

[责任编辑: 张玉玲]